

# مقایسه‌ی نتایج آزمون پیچش و استاندارد CEB-FIP MODEL CODE جهت ارزیابی چسبندگی ملات/ فولاد و ارائه‌ی ضریب چسبندگی اصلاحی

علی صابری ورزنده\* (دکتری)

محمود نادری (استاد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۲)  
دوری ۳۹، شماره ۳، صص. ۱۳۱-۱۳۸، (پنداشت فنی)

هنگامی که بتن در ارتباط با فولاد قرار دارد، تنش‌های ناشی از جمع‌شدگی، تأثیر منفی در چسبندگی بین آنها دارد. جمع‌شدگی باعث تنش‌های کششی در بتن و تنش‌های برشی در سطح مشترک بین آنها می‌شود. همچنین برای ترمیم المان‌های بتنی گاهی در برداشتن بتن تا سطح آرماتورها اجبار وجود دارد و باید از ملات‌های تعمیری استفاده کرد، لذا بحث جمع‌شدگی ملات‌های تعمیری و چسبندگی آنها به فولاد، بسیار مهم است. مطابق استاندارد CEB-FIP، چسبندگی بین مصالح سیمانی و آرماتور ساده برابر  $\tau = 0.3\sqrt{f_c}$  است. اما شرایطی برای در نظر گرفتن نوع عمل‌آوری ارائه نشده است. در پژوهش حاضر، برای این‌که هم از چسبندگی بین ملات‌های تعمیری با فولاد ارزیابی صورت گیرد و هم نتایج به دست آمده با آیین‌نامه‌ی استاندارد مقایسه شود، آزمون‌هایی روی ملات‌های تعمیری پرکاربرد در ایران انجام شده است. توسط آزمون پیچش، چسبندگی بین ملات و فولاد تحت عمل‌آوری‌های مختلف ارزیابی و نتیجه‌گیری شد که معادله‌ی اخیر در صورتی استفاده خواهد شد که نمونه تا لحظه‌ی آزمایش تحت عمل‌آوری باشد، در غیر این صورت افت زیادی در مقدار چسبندگی رخ می‌دهد، که حتی تا ۵۰٪ نیز می‌رسد.

ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir  
profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

واژگان کلیدی: چسبندگی، آزمون پیچش، ملات، فولاد.

## ۱. مقدمه

در هر سازه‌ی که بتن و فولاد در کنار یکدیگر استفاده شده باشند، امکان دارد به دلایل مختلفی احتیاج به تعمیر وجود داشته باشد. در برخی قسمت‌های سازه، کاور بتنی اعضاء بتن مسلح، از قبیل: تیر، ستون، سقف و... دچار خردشدگی می‌شود و آرماتورها نمایان می‌شوند، که همین امر سبب زنگ‌زدگی و خوردگی آرماتورها و آسیب رساندن به مقطع بتنی می‌شود، که نیاز به تعمیر دارند و در اغلب موارد با استفاده از ملات‌های سیمانی، اقدام به اصلاح قسمت خرد شده می‌شود. چسبندگی بین بتن و فولاد هم از نظر رفتار سازه‌ی و همچنین ترک‌های به وجود آمده در اثر جمع‌شدگی بسیار مهم است. عوامل مختلفی در مقاومت چسبندگی تأثیرگذار است، از جمله: جمع‌شدگی بتن متصل به فولاد، هندسه و سطح فولاد، وجود اندکی زنگ‌زدگی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۹/۹، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۸، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۲۵.

استناد به این مقاله:

صابری ورزنده، علی و نادری، محمود، ۱۴۰۲. مقایسه‌ی نتایج آزمون پیچش و استاندارد CEB-FIP MODEL CODE جهت ارزیابی چسبندگی ملات/ فولاد و ارائه‌ی ضریب چسبندگی اصلاحی. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۳)، صص. ۱۳۱-۱۳۸. DOI:10.24200/J30.2023.61417.3170

جدول ۱. مشخصات مکانیکی چسب رزین اپوکسی دو جزئی.

مدول کشسانی	مقاومت فشاری ۷ روزه	مقاومت برشی	زمان گیرش	
			۲۵°C	۳۵°C
۱۲۷۵۰ مگاپاسکال	۷۰ مگاپاسکال	۱۵ مگاپاسکال	۴ ساعت	۱۰ ساعت

## ۲. کارهای آزمایشگاهی

### ۱.۲. مصالح مصرفی

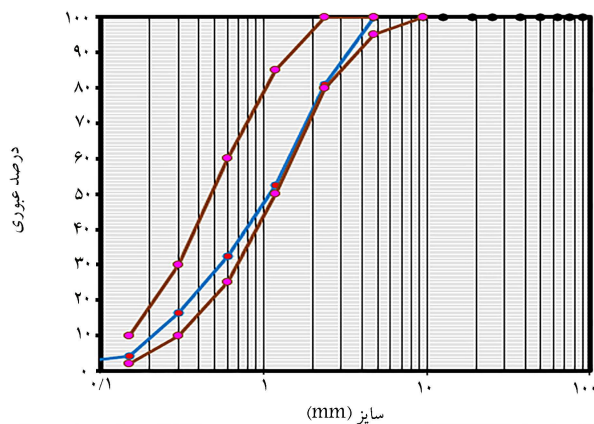
سیمان استفاده شده از نوع پرتلند تیپ II با چگالی ۳۰۰۷ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. ماسه با اندازه‌ی بیشینه‌ی ۴/۷۵ میلی‌متر استفاده شده و میزان جذب آب آن براساس استاندارد ASTM C۱۲۷<sup>[۲۰]</sup> مساوی ۳/۲٪ به دست آمده است. دانه‌بندی ماسه طبق استاندارد ASTM C۱۳۶<sup>[۲۱]</sup> انجام پذیرفته است. چگالی ماسه برابر ۲۵۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. نمودار دانه‌بندی ماسه در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

از چسب رزین اپوکسی دو جزئی با ترکیب حجمی ۱:۱ استفاده شده است. مشخصات مکانیکی چسب رزین اپوکسی در جدول ۱ ارائه شده است. بستر فولادی استفاده شده دارای ابعاد ۲۰۰ میلی‌متر در ضخامت ۵ میلی‌متر بوده است.

### ۲.۲. ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های مورد نیاز جهت اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی بین ملات و فولاد با استفاده از آزمون «پیچش»، ابتدا صفحات فولادی با ابعاد ۲۰۰ × ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر روی سطح زمین قرار گرفته و سپس قالب‌های فلزی روی صفحات گذاشته شده است (شکل ۲). سپس دوغاب آب سیمان سفت بر سطح یاد شده اعمال و قبل از خشک شدن آن، ملات‌های تعمیری بر بستر فولادی ریخته شده‌اند (شکل ۳).

طرح مخلوط ملات‌های تعمیری در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها.

جدول ۲. طرح اختلاط ملات‌های تعمیری.

ردیف	نسبت مصالح به سیمان		
	آب	ماسه	سیمان
۱	۰/۵	۳	۱
۲	۰/۵	۲	۱

مقاومت چسبندگی بین ملات و بستر است. جمع‌شدگی حاصل از خشک شدن معمولاً به دلیل خروج رطوبت از داخل ملات سخت شده اتفاق می‌افتد. از آن‌جا که در منافذ مویرگی خمیر سیمان هیدراته شده، آب وجود دارد، پس از خروج آب از منافذ مذکور و همچنین از سطح ملات، جمع‌شدگی رخ می‌دهد.<sup>[۳]</sup> روش‌های مرطوب‌سازی می‌تواند از خروج رطوبت از داخل ملات جلوگیری کند. چسبندگی بین ملات و بستر تحت عمل‌آوری مرطوب حدود ۳/۵ برابر چسبندگی در فضای آزاد است.<sup>[۴]</sup> برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی بین فولاد و مصالح سیمانی، مطالعات فراوانی انجام شده است. لین<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، از یک لایه‌ی رزینی روی آرماتورها جهت جلوگیری از کاهش چسبندگی بین بتن و آرماتورها به دلیل ترک‌خوردگی بتن و خوردگی فولاد استفاده کرده‌اند.<sup>[۵]</sup> کولوریس<sup>۲</sup> و همکارش (۲۰۲۰)، در مطالعه‌ی خود دریافتند که عواملی مانند ترک‌خوردگی و خوردگی فولاد، باعث افت ۶۰ درصدی چسبندگی می‌شود.<sup>[۶]</sup> آلوک و همکاران (۲۰۲۰)<sup>[۷]</sup> و ونزی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۰)<sup>[۸]</sup> در خصوص تأثیر شرایط مختلف دمایی در مقاومت چسبندگی بین بتن و آرماتور نتیجه گرفتند که در دماهای بالا، مقاومت چسبندگی بین بتن و آرماتور معمولی بیشتر از چسبندگی بین بتن و آرماتورهای کامپوزیت است. برتیت<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، با استفاده از روش پوش - اوت مشخص کردند که استفاده از چسب، باعث افزایش چسبندگی تا مقدار ۳/۴ مگاپاسکال می‌شود؛ اما لایه‌ی تعمیری بدون چسب، مقاومت چسبندگی اندکی در حدود ۰/۸ مگاپاسکال دارد.<sup>[۹]</sup> یوسف و همکاران (۲۰۲۰)، در بررسی تأثیر تنش‌های موجود در مقاومت چسبندگی بین بتن و فولاد دریافتند که چسبندگی برای المان بتنی تحت تنش، حدود ۶۳٪ کمتر از المان آزاد بدون تنش است.<sup>[۱۰]</sup> در سال ۲۰۱۹، نیز برخی پژوهشگران در مطالعات خود دریافتند که افزودن الیاف به بتن، باعث افزایش مقاومت چسبندگی بین بتن و فولاد می‌شود.<sup>[۱۱]</sup>

یکی از روش‌های نوین برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی برشی بین مصالح، آزمون پیچش<sup>[۱۲]</sup> است. در مطالعات پیشین با استفاده از آزمون پیچش مشخص شده است که اعمال پیش‌فشار روی ملات باعث افزایش مقاومت چسبندگی برشی بین لایه‌ی تعمیری و بتنی برابر ۳۶/۹٪ شده است.<sup>[۱۳]</sup> صابری و نادری (۲۰۲۲)، با استفاده از آزمون پیچش دریافتند که الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش چسبندگی برشی حدود ۷۶٪ می‌شود.<sup>[۱۴]</sup> ایشان در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۲۱)، با بررسی نتایج حاصل از آزمون پیچش با آزمون استاندارد کشیدن از سطح،<sup>[۱۵]</sup> ضریب همبستگی بالای ۹۵٪ بین نتایج به دست آمد، که بیان‌گر دقت بالای آزمون پیچش است.<sup>[۱۶]</sup> همچنین نتایج یکی دیگر از مطالعات ایشان در سال ۲۰۲۰، بر روی چسبندگی بین ملات‌های اصلاح شده با پلیمر و بتن با استفاده از آزمون پیچش نشان داده است که پلیمر باعث افزایش مقاومت چسبندگی در حدود ۳/۵ برابر شده است.<sup>[۱۸]</sup> در پژوهش حاضر، با به کارگیری آزمون نوین پیچش، اقدام به اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی برشی بین ملات‌های تعمیری و فولاد شده است. سپس نتایج حاصل از آزمون پیچش با استاندارد CEB-FIP MODEL CODE<sup>[۱۹]</sup> مقایسه شده است. همچنین از آزمون پیچش، برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌های تعمیری به صورت درجا استفاده و با آزمون استاندارد مقایسه شده است.



شکل ۴. کرگیری ملات‌ها.



شکل ۲. آماده‌سازی بستر فولادی.



شکل ۵. انجام آزمون پیچش.



شکل ۳. اعمال ملات روی بستر فولادی.



شکل ۶. کمیراتور جمع‌شدگی.

آزمایش‌ها در سنین ۷، ۲۲ و ۹۰ روزه انجام شده‌اند. یک سری از نمونه‌ها به مدت ۱ هفته داخل آب بوده و سپس از آب خارج شده و یک سری از نمونه‌ها از ابتدا تا زمان آزمایش در عمل‌آوری داخل آب قرار داشته‌اند.

### ۳.۲. روش‌های آزمایشگاهی

برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی برشی بین ملات و فولاد، ابتدا با استفاده از دستگاه کرگیری، یک مغزه‌ی جزئی به قطر ۵۰ میلی‌متر روی ملات تا سطح فولاد ایجاد شده است (شکل ۴).

سپس استوانه‌ی فلزی آزمون پیچش با استفاده از چسب رزین اپوکسی روی مغزه چسبانده و در انتها، با استفاده از یک ترک‌متر<sup>۵</sup> معمولی، به استوانه لنگر پیچشی وارد شده است تا ملات از فولاد جدا شود (شکل ۵).

در استاندارد CEB-FIP MODEL CODE، از نیروی کششی استفاده شده و سطح مقطع درگیر نیز سطح اطراف آرماتور فولادی و بتن بوده است. سپس با تقسیم نیروی کششی بر سطح مقطع، مقدار مقاومت برشی بر حسب مگاپاسکال ارائه شده است. در پژوهش حاضر، از لنگر پیچشی استفاده شده است و سطح مقطع درگیر نیز در شکل ۵ مشاهده می‌شود. سپس با استفاده از معادله‌ی مقاومت مصالح رابطه‌ی ۱، مقدار مقاومت برشی بر حسب مگاپاسکال تبدیل شده است. هم در استاندارد مذکور و هم در پژوهش حاضر، مقدار مقاومت برشی بر حسب مگاپاسکال به دست آمده است، که ماهیت یکسانی دارند.

$$\tau = \frac{Tr}{J} \rightarrow J = \frac{\pi r^4}{2} \rightarrow \tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (1)$$

برای به دست آوردن میزان جمع‌شدگی نمونه‌ها از استانداردهای ASTM C۱۵۷<sup>[۲۲]</sup> و ASTM C۴۹۰<sup>[۲۳]</sup> استفاده شده است. در شکل ۶، دستگاه اندازه‌گیری جمع‌شدگی مشاهده می‌شود.

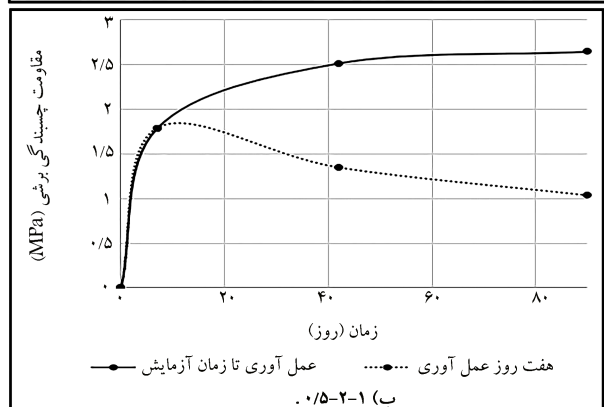
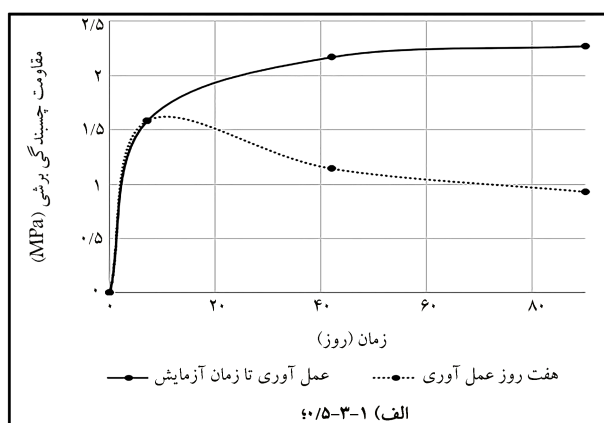
برای ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها در آزمون «پیچش»، ابتدا یک استوانه‌ی فولادی به قطر ۵۰ میلی‌متر روی سطح محل آزمون چسبانده و سپس با استفاده از یک ترک‌متر به استوانه‌ی فولادی لنگر پیچشی اعمال شده است، تا نمونه‌ی آزمایشی

جدول ۳. تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها.

مشخصات نمونه‌ها	تعداد نمونه‌ها	نوع آزمایش‌ها
مکعبی ۵ سانتی متر مکعب	۱۲۰	مقاومت فشاری
مکعبی ۱۵ سانتی متر مکعب	۴۰	آزمون پیچش برای ارزیابی مقاومت فشاری
۲۸ × ۲/۵ × ۲/۵ سانتی متر	۳۰	جمع‌شدگی
۲/۵ × ۱۵ × ۱۵ سانتی متر	۴۸	چسبندگی

جدول ۴. مقاومت برشی حاصل از آزمون پیچش (MPa).

نوع ملات	زمان آزمون	۷ روز عمل آوری	عمل آوری تا زمان آزمایش
۰/۵ - ۳ - ۱	۷ روزه	۱/۶	۱/۶
	۴۲ روزه	۱/۱۴	۲/۱۷
	۹۰ روزه	۰/۹۳	۲/۲۷
۰/۵ - ۲ - ۱	۷ روزه	۱/۸	۱/۸
	۴۲ روزه	۱/۳۴	۲/۵۱
	۹۰ روزه	۱/۰۳	۲/۶۴



شکل ۷. ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها.

دچار شکست شود (شکل ۷). با توجه به آسیب وارده از آزمون «پیچش»، که بسیار سطحی و جزئی است، آزمون پیچش در ردیف آزمون‌های «نیمه مخرب» یا به عبارت دقیق‌تر با خرابی جزئی قرار دارد. در آزمون پیچش، با توجه به این‌که شکست در خود نمونه‌ی مورد نظر رخ می‌دهد، نتایج آن در مقابل آزمون‌های تعیین سختی سطح یا آزمون‌هایی که به صورت غیرمستقیم مقاومت را تعیین می‌کنند، اعتبار بیشتری دارد. همچنین برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری ملات‌ها<sup>[۲۴]</sup> و مقایسه‌ی آنها با نتایج حاصل از آزمون پیچش، متوسط ۶ نمونه‌ی مکعبی استاندارد ۵۰ میلی‌متری استفاده شده است.

برای ارزیابی مقاومت فشاری توسط آزمون پیچش، ابتدا تعدادی نمونه در زیر چک بتن‌شکن قرار گرفته و مقاومت فشاری آنها تعیین شده است. سپس تعدادی نمونه‌ی مشابه نیز با استفاده از آزمون پیچش آزمایش شده‌اند. در انتها، نمودار همبستگی بین آنها ارائه شده است. در کارهای آینده بدون این‌که نمونه در زیر چک بتن‌شکن قرار گیرد، فقط با انجام آزمون پیچش می‌توان مقدار مقاومت فشاری آن را تخمین زد. در جدول ۳، تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها در پژوهش حاضر ارائه شده است.

شکل ۸. مقاومت چسبندگی برشی بین ملات و صفحه‌ی فولادی حاصل از آزمون «پیچش».

با بستر فولادی حاصل از آزمون «پیچش» مشاهده می‌شود. برای بررسی دقیق داده‌ها، ابتدا نتایج مقاومت چسبندگی برشی بین ملات و فولاد حاصل از آزمون پیچش در جدول ۴ ارائه شده است.

مطابق شکل ۸ الف مشاهده می‌شود که مقاومت چسبندگی برشی بین ملات

### ۳. نتایج و تحلیل آنها

#### ۳.۱. چسبندگی برشی بین ملات و فولاد

در شکل ۸، مقاومت چسبندگی برشی بین ملات‌های تعمیر ۵-۳-۱ و ۰/۵-۲-۱

است. مقدار جمع‌شدگی، برای ملات عمل‌آوری شده در آب، به میزان ۰/۵۹٪ کمتر از جمع‌شدگی ملات‌های قرار گرفته در فضای آزاد بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که جمع‌شدگی ملات‌های عمل‌آوری شده در آب، کمترین مقدار را داشته و بیشترین مقدار جمع‌شدگی مربوط به نمونه‌های رها شده در فضای آزاد بوده است. جمع‌شدگی در اثر خروج رطوبت از ملات سخت شده اتفاق می‌افتد. با توجه به این‌که در منافذ موئینه‌ی سیمان هیدراته شده، آب وجود دارد؛ لذا به محض خروج آب از منافذ موئینه‌ی مذکور، آب جذب سطحی از بین می‌رود و جمع‌شدگی اتفاق می‌افتد.<sup>[۳]</sup>

زمانی که نمونه هنوز در عمل‌آوری قرار دارد، هیچ جمع‌شدگی رخ نداده و نمونه دچار ترک خوردگی نشده است. اما در مورد ملاتی که در عمل‌آوری قرار ندارد، به دلیل خروج آب از منافذ موئینه‌ی داخل ملات و همچنین از دست رفتن آب جذب سطحی شده، جمع‌شدگی حاصل می‌شود، که نتیجه آن ایجاد ترک در داخل ملات است.

### ۲.۳. مقایسه‌ی آزمون پیچش با استاندارد

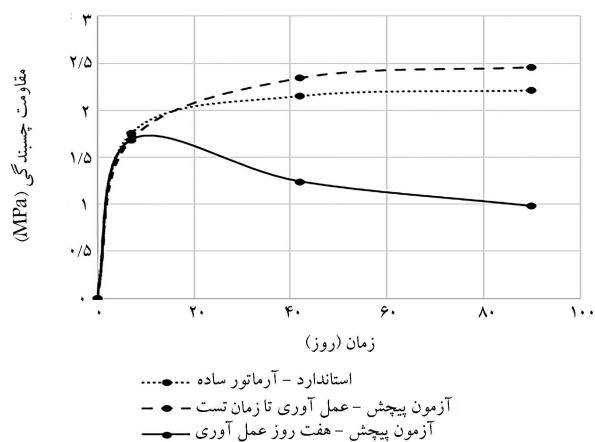
در استاندارد CEB-FIP Model Code، مقاومت چسبندگی برشی بین آرماتور ساده و بتن مطابق رابطه‌ی ۲ است:

$$\tau = 0.3 \sqrt{f_c} \quad (2)$$

که در آن،  $\tau$  برابر مقاومت چسبندگی برشی بر حسب مگاپاسکال و  $f_c$  مقاومت فشاری نمونه‌ی بتن استوانه‌یی بر حسب مگاپاسکال است. با توجه به استاندارد اشاره شده برای شرایط حاکم بر رابطه‌ی ۲، این ملاحظات اعمال شده است:

فرض شده است که مقدار کرنش بتن و فولاد در آرماتور و بتن، در مناطقی از سازه که فولاد تحت فشار یا کشش است، یکسان هستند. همچنین پارامتر ارائه شده برای فولاد تقویت‌کننده صاف است، که بسته به عوامل مؤثر اصلی، مانند: زبری سطح میله، شرایط اتصال و مقاومت بتن معتبر است. معادله‌ی اخیر برای بتن محصور و غیرمحصور معتبر است. معادله‌ی ۲ فقط در حالت‌هایی از بارگذاری، که بتن در معرض کشش جانبی قرار نمی‌گیرد، صادق است. در پژوهش حاضر، نیز از فولاد ساده با زبری سطحی به صورت عادی استفاده شده است. همچنین به ملات قرار گرفته روی فولاد، هیچ‌گونه نیروی کششی اعمال نشده است.

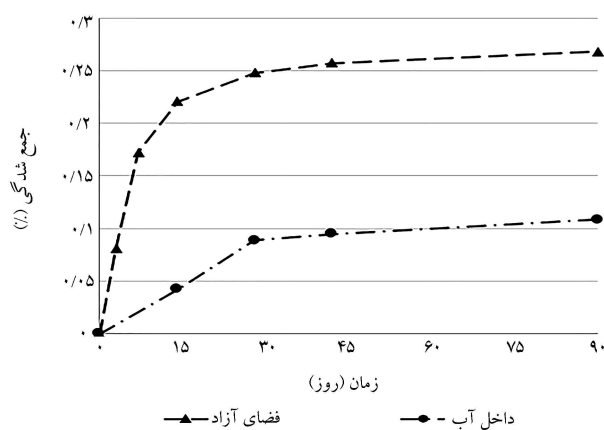
در شکل ۱۰، نتایج حاصل از آزمون پیچش جهت اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی



شکل ۱۰. نتایج مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمون‌های پیچش و استاندارد.

تعمیری ۱-۳-۵° و بستر فولادی برای نمونه‌هایی که تا زمان آزمایش تحت عمل‌آوری قرار داشته‌اند، با گذشت زمان در حال افزایش است. مقاومت چسبندگی برشی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روز برای نمونه‌های اخیر به ترتیب برابر با ۱/۵۷۹، ۲/۱۶۹ و ۲/۲۷ مگاپاسکال بوده است. اما نمونه‌هایی که به مدت ۷ روز تحت عمل‌آوری بوده و سپس از عمل‌آوری خارج و در فضای آزاد رها شده‌اند، دچار افت مقاومت چسبندگی برشی بین ملات تعمیری و بستر فولادی در سنین ۴۲ و ۹۰ روز شده‌اند. مقاومت چسبندگی برشی نمونه‌های اخیر در سنین ذکر شده، به ترتیب برابر ۱/۱۴۱ و ۰/۹۳ مگاپاسکال بوده است. ملاحظه می‌شود که افزایش مقاومت چسبندگی برشی نمونه‌هایی که به صورت دائم تحت عمل‌آوری بوده‌اند، نسبت به نمونه‌هایی که فقط ۷ روز عمل‌آوری شده‌اند، به مقدار ۹۰ و ۱۴۴ درصد به ترتیب در سنین ۴۲ و ۹۰ روز بوده است.

از شکل ۸ ب مشاهده می‌شود که مقاومت چسبندگی برشی بین ملات تعمیری ۱-۲-۵° و بستر فولادی برای نمونه‌هایی که تا زمان آزمایش تحت عمل‌آوری قرار داشته‌اند، با گذشت زمان در حال افزایش بوده است. مقاومت چسبندگی برشی در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روزه برای نمونه‌های ذکر شده به ترتیب برابر با ۱/۷۸۵، ۲/۵۱ و ۲/۶۴ مگاپاسکال بوده است. اما نمونه‌هایی که به مدت ۷ روز تحت عمل‌آوری بوده و سپس از عمل‌آوری خارج و در فضای آزاد رها شده‌اند، دچار افت مقاومت چسبندگی برشی بین ملات تعمیری و بستر فولادی در سنین ۴۲ و ۹۰ روز شده‌اند. مقاومت چسبندگی برشی نمونه‌های اخیر در سنین ۴۲ و ۹۰ روز، به ترتیب برابر ۱/۳۴۳ و ۱/۳۲ مگاپاسکال بوده است. ملاحظه می‌شود که افزایش مقاومت چسبندگی برشی نمونه‌هایی که به صورت دائم تحت عمل‌آوری بوده‌اند، نسبت به نمونه‌هایی که فقط ۷ روز عمل‌آوری شده‌اند، به مقدار ۸۷ و ۱۵۶ درصد به ترتیب در سنین ۴۲ و ۹۰ روز بوده است. یکی از دلایل اصلی افت مقاومت چسبندگی برشی، جمع‌شدگی ملات‌های تعمیری است. در شکل ۹، مقدار جمع‌شدگی ملات‌ها مشاهده می‌شود. برای بررسی دقیق داده‌ها، ابتدا نتایج جمع‌شدگی ملات‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق شکل ۹، مقدار جمع‌شدگی ۹۰ روزه برای ملات‌های عمل‌آوری شده در آب و رها شده در فضای آزاد به ترتیب برابر ۱۰/۸۳٪ و ۲۶/۷۹٪ درصد بوده



شکل ۹. جمع‌شدگی ملات‌های تعمیری.

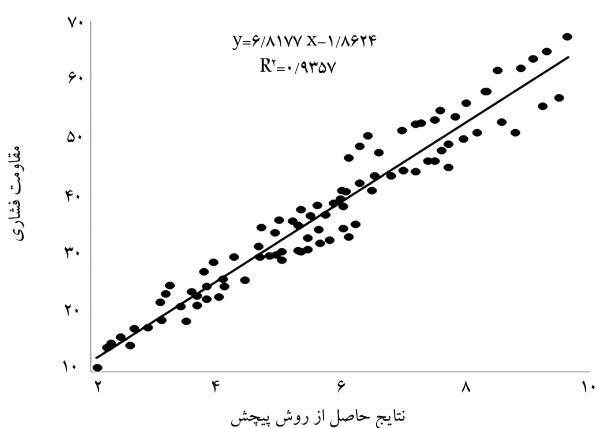
جدول ۵. جمع‌شدگی ملات‌ها (%).

نوع ملات	روزه ۱۴	روزه ۲۸	روزه ۴۲	روزه ۹۰
داخل آب	۰/۰۴۲	۰/۰۸۸	۰/۰۹۵	۰/۱۰۸
فضای آزاد	۰/۲۲۰	۰/۲۴۸	۰/۲۵۷	۰/۲۶۸



جدول ۶. مقاومت برشی حاصل از آزمون پیچش (MPa).

نوع	زمان آزمون	۷ روز عمل‌آوری	عمل‌آوری تا زمان آزمایش
۱ - ۳ - ۵ / ۰	۷ روزه	۱/۶	۱/۶
	۴۲ روزه	۱/۱۴	۲/۱۷
	۹۰ روزه	۰/۹۳	۲/۲۷
۱ - ۲ - ۵ / ۰	۷ روزه	۱/۸	۱/۸
	۴۲ روزه	۱/۳۴	۲/۵۱
	۹۰ روزه	۱/۰۳	۲/۶۴
	استاندارد		۱/۷ ۲/۱۵ ۲/۲۱



شکل ۱۱. همبستگی میان مقاومت فشاری ملات تعمیری با نتایج حاصل از آزمون پیچش (مگاپاسکال).

و ضریب تعیین  $0/93/6$  داشته است. با توجه به ضریب همبستگی بالا بین نتایج حاصل از آزمون «پیچش» و مقاومت فشاری ملات تعمیری، به راحتی می‌توان با استفاده از آزمون درجی «پیچش» و معادله  $y = 6/82x + 1/86$ ، مقاومت فشاری ملات را تعیین کرد.

#### ۴. نتیجه گیری

- برای حالت‌های عملی که معمولاً حدود ۷ روز عمل‌آوری انجام می‌شود، پیشنهاد می‌شود مقاومت چسبندگی برشی بین فولاد و ملات برای نمونه‌هایی که دست‌کم یک هفته تحت عمل‌آوری مرطوب قرار داشته و با شرایط مناسب تهیه و نگهداری شده‌اند، مطابق معادله  $\tau = 0/15\sqrt{f_c}$  در نظر گرفته شود؛

- نتایج مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمون پیچش برای نمونه‌هایی که تا زمان آزمایش تحت عمل‌آوری داخل آب بوده‌اند، در سنین پایین، تقریباً برابر معادله‌ی ارائه شده از استاندارد CEB-FIP Model Code است؛

- در سنین بالاتر، نتایج مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمون پیچش بین

برشی بین ملات و فولاد با نتایج به دست آمده از معادله‌ی استاندارد CEB-FIP Model Code برای آرماتورهای ساده مشاهده می‌شود. برای بررسی دقیق داده‌ها، ابتدا نتایج مقاومت چسبندگی برشی بین ملات و فولاد حاصل از آزمون پیچش و استاندارد مذکور در جدول ۶ ارائه شده است.

مطابق شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از آزمون پیچش برای نمونه‌هایی که تا زمان آزمایش تحت عمل‌آوری داخل آب بوده‌اند، در سنین پایین تقریباً برابر معادله‌ی ارائه شده از استاندارد CEB-FIP Model Code است. اما در سنین بالاتر، نتایج حاصل از آزمون پیچش برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی برشی بین ملات و فولاد به طور متوسط بیش از  $10\%$ ، بیشتر از معادله‌ی ارائه شده توسط استاندارد CEB-FIP Model Code بوده است. با توجه به مقایسه‌ی انجام شده مشاهده می‌شود که معادله‌ی ارائه شده توسط استاندارد مذکور، اندکی محافظه‌کارانه است. البته لازم به ذکر است که در آزمون پیچش از روش کرگیری استفاده می‌شود و همین کرگیری مقداری تأثیر منفی در مقاومت چسبندگی برشی می‌گذارد. لذا در حالت واقعی، اختلاف نتایج بیشتر از  $10\%$  است. همچنین برای نمونه‌هایی که به مدت یک هفته تحت عمل‌آوری بوده و سپس در فضای آزاد رها شده‌اند، مشاهده می‌شود که اختلاف زیادی بین مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمون پیچش با معادله‌ی ارائه شده توسط استاندارد CEB-FIP Model Code وجود دارد. به گونه‌ی که نتایج حاصل از رابطه‌ی تئوری استاندارد حدود ۲ برابر نتایج حاصل از آزمون پیچش است. لذا برای حالت‌های عملی که معمولاً حدود ۷ تا ۱۰ روز عمل‌آوری انجام می‌شود، پیشنهاد می‌شود چسبندگی خالص بین فولاد و ملات برای نمونه‌هایی که دست‌کم یک هفته عمل‌آوری مرطوب شده و با شرایط مناسب تهیه و نگهداری شده‌اند، مطابق معادله‌ی ۳ در نظر گرفته شود.

$$\tau = 0/15\sqrt{f_c} \quad (3)$$

#### ۳.۳. ارزیابی مقاومت فشاری ملات‌ها با آزمون پیچش

در شکل ۱۱، همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون پیچش با مقاومت فشاری ملات‌های تعمیری مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که همبستگی بسیار بالایی بین نتایج حاصل از آزمون «پیچش» با مقاومت فشاری ملات‌های تعمیری وجود دارد، به گونه‌ی که نتایج آزمون «پیچش» با مقاومت فشاری ملات تعمیری، ضریب همبستگی  $0/96/7$

۱۵۶ درصد به ترتیب در سنین ۴۲ و ۹۰ روز بوده است؛

- با به کارگیری آزمون پیچش، می توان نتایج حاصل از آزمون پیچش را با استفاده از معادله  $y = ۶/۸۲x + ۱/۸۶$  به مقاومت فشاری ملات های تعمیراتی تبدیل کرد؛
- مقدار جمع شدگی ۹۰ روزه برای ملات تحت عمل آوری در آب و رها شده در فضای آزاد به ترتیب برابر  $۱/۰۸۳$  و  $۰/۲۶۷۹$  درصد بوده است. مقدار جمع شدگی، برای ملات عمل آوری شده در آب، به میزان  $۰/۵۹$  کمتر از جمع شدگی ملات رها شده در فضای آزاد بوده است.

- ملات و فولاد به طور متوسط بیش از  $۰/۱$  بیشتر از معادله ای ارائه شده توسط استاندارد CEB-FIP Model Code بوده است؛
- برای نمونه هایی که به مدت یک هفته تحت عمل آوری بوده و سپس در فضای آزاد رها شده اند، مشاهده می شود اختلاف زیادی بین مقاومت چسبندگی برشی حاصل از آزمون پیچش با معادله ای ارائه شده توسط استاندارد CEB-FIP Model Code وجود دارد؛
- افزایش مقاومت چسبندگی برشی نمونه هایی که به صورت دائم تحت عمل آوری بوده اند، نسبت به نمونه هایی که فقط ۷ روز عمل آوری شده اند، به مقدار ۸۷ و

### پانویس ها

1. Lin
2. Koulouris
3. Wanjie
4. Berthet
5. Torque Meter

### منابع (References)

1. Neville, A.M. and Brooks, J.J., 2013. *Tecnologia do Concreto*, Porto Alegre, Bookman.
2. Araujo, D.L., Danin, A.R., Melo, M.B. and et al., 2013. Influence of steel fibers on the reinforcement bond of straight steel. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais - RIEM*, 6(2), pp.307-338.
3. Neville, A.M., 2012. *Properties of Concrete*, 5th ed., Harlow, United Kingdom.
4. Naderi, M., 2008. Adhesion of different concrete repair systems exposed to different environments. *J. Adhesion*, 84(3), pp.78-104. <https://doi.org/10.1080/00218460801888433>.
5. Lin, H., Zhao, Y., Yang, J.Q. and et al., 2019. Effects of the corrosion of main bar and stirrups on the bond behavior of reinforcing steel bar. *Constr. Build. Mater.*, 225, pp.13-28. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.156.
6. Koulouris, K. and Apostolopoulos, Ch., 2020. An experimental study on effects of corrosion and stirrups spacing on bond behavior of reinforced concrete. *Metals*, 10(10), p.1327. DOI:10.3390/met10101327.
7. Alok, A.D., Dhpande, D. and Kum0ar, R., 2020. Temperature effects on the bond behavior between deformed steel reinforcing bars and hybrid fiber-reinforced strain-hardening cementitious composite. *Cement and Concrete Composites*, 233, p.117337. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117337.
8. Wanjie, Z., Jiongfeng, L., Dawei, L. and et al., 2020. Bond behavior between steel rebar and RCA concrete after exposure to elevated temperatures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, Article ID 5230295, p.10. DOI:10.1155/2020/5230295.
9. Berthet, J.F., Yurtdas, I., Delmas, Y. and et al., 2011. Evaluation of the adhesion resistance between steel and concrete by push out test. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31(2), pp.75-83. DOI:10.1016/j.ijadhadh.2010.11.004.
10. Yousef, R.A., Mahmoud, G., Aref, A.A. and et al., 2020. Bond behavior between concrete and steel rebars for stressed elements. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), pp.1-9. DOI:10.1016/j.asej.2020.10.001.
11. Chu, S.H. and Kwan, A.K.H., 2019. A new bond model for reinforcing bars in steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 104, p.103405. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2019.103405.
12. Huang, L., Lihua, X., Chi, Y. and et al., 2019. Bond strength of deformed bar embedded in steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 218, pp.176-192. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.096.
13. Naderi, M., 2007. New twist-off method for the evaluation of in-situ strength of concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 35(6), pp.602-608. ISSN: 0090-3973.
14. SaberiVarzaneh, A. and Naderi, M., 2022. The effect of initial compression on the interface of repair/concrete and the evaluation of the compressive strength of mortars. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(5), pp.163-179. DOI:10.22065/JSCA.2021.252708.2260.
15. SaberiVarzaneh, A. and Naderi, M., 2022. Bond strength of fiber-reinforced mortar and concrete interface under pre-stress. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 11.2(30), pp.113-130. DOI:10.22075/JRCE.2022.25326.1572.
16. ASTM C1583., 2004. Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method). West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
17. SaberiVarzaneh, A. and Naderi, M., 2021. Determination of shrinkage, tensile and compressive strength of

- repair mortars and their adhesion on the concrete substrate using "Twist-off" and "Pull-off" methods. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45, pp.2377-2395. DOI:10.1007/s40996-020-00548-w.
18. SaberiVarzaneh, A. and Naderi, M., 2020. Numerical and experimental study of semi-destructive tests to evaluate the compressive and flexural strength of polymer-modified mortars and their adhesion to the concrete substrate. *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials*, 50(4), pp.537-544.
  19. CEB-FIP Model Code. for concrete structures. 2010. *Comité Euro-International du Béton*, , Secretariat Permanent, Case Postale 88, CH-1015 Lausanne, Wal-raven, p.318.
  20. ASTM 127-15., 2015. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate., ASTM International, Wst Conshohocken, PA.
  21. ASTM C136-01., 2001. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA.
  22. ASTM C157., 2008. Test method for length change of hardened hydraulic cement mortar and concrete. West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
  23. ASTM C490., 2011. Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
  24. ASTM C109., 2013. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). American Society for Testing and Materials.